澳洲植物表型體中心參訪-
簡介澳洲植物表型體技術發展現況

農試所生技組 林大鈞 楊佐琦　農試所種原組 溫英杰

一、前言

由於作物的重要性狀大都由數量遺傳所調控，這些基因的表現常受各種環境因子的影響，而不易探索參與的功能基因。表型體學 (Phenomics) 是基因型 (Genotype, G) 表現的整體結果，更是育種目標 (如耐寒、耐熱、耐旱等特性) 植物整體性狀的最終表現，可謂是育種成敗的決定因素。由於表型體表現易受環境因子 (Environment, E) 的影響，因此一個遺傳性狀 (G) ，必須在穩定的環控狀態 (E) 下，進行外表性狀測定，才能獲得準確、穩定的外表型 (P) 表現，進而確認二者間的關係，據此結果所開發之分子標誌才具可靠性 (Grosskinsky et al., 2015; Porter and Christensen, 2013)。有鑒於此，各國植物研究單位乃至於大型國際種子公司，紛紛投入分析表型體之各種軟硬體設施建置，以建立精準的外表型分析平台，進而對複雜的植物性狀進行調查與探討。近來國際研究社群已發展出各種表型體分析平台，其中以瑞典 (Crop Design, LemnaTech)、澳洲 (Australian Plant Phenomics Facility, APPF-CSIRO, Australian National University 及University of Adelaide)、英國 (UK Plant Phenomics)、法國 (PHENOARCH, INRA)，及跨國農業生技公司如Syngenta公司所建置的平台最為進步。目前國內雖有投入許多生理性狀偵測器 (如水分、溫度、光度、VIS、NIR、UV、IR、螢光) 的開發，亦有影像擷取、儲存及分析系統的開發 (圖一)，但整體而言，仍缺乏整合完善的表型體學分析平台。究其原因，為投入表型體分析平台所需的資源極多、規模龐大有別於一般研究。綜合看來，建立平台必需同時具備精密的環境控制與自動化的高效能外表型資料之擷取設備與分析技術，同時須要結合生物資訊分析技術，將精確控制表型分析結果對應相關基因型資訊或選拔指標，所得成果方可應用於產業育種過程外表型的精確篩選，迅速育成新品種，進而取得產業優勢。

作　　者：林大鈞聘用副研究員
連絡電話：04-23317353

在台灣要發展這種投入資金龐大、高階人才需求較多的新興科技，只能以

國家級計畫的方式整合不同的領域團隊，方有可能達成。因此，透過政策型國家科研計畫的執行，建構國家級的表型體分析中心，希望藉由結合植物生理學、遺傳學、作物栽培、育種學、農業機械、環控、統計學等領域專家，組成一個跨領域的表型體分析團隊，共同執行此一巨大重要任務。爰此，擬先將觀摩現有的國際表型體分析中心作為我國建置時的參考依據。經評估發現，澳洲表型體中心 (Australian Plant Phenomics Facility, APPF) 具備完善表型體分析設施，且對國際研究社群採開放設備及提供相關服務。因此於2017年10月7日，由中研院施明哲秘書長、葉國禎主任、羅筱文小姐、本所種原組溫英杰組長、生技組楊佐琦組長及林大鈞聘用副研究員等組成參訪團隊，進行澳洲表型體分析中心的參訪。參訪地點有APPF位於坎培拉之高解析植物表型體中心 (High Resolution Plant Phenomics Centre, HRPPC)、澳洲國立大學分支中心 (ANU node) 及阿德雷德植物加速中心 (The Plant Accelerator, PA) 等三個分支中心 (nodes)，除參觀其核心設施外，並瞭解受訪單位所建立之表型體核心技術，以及這些技術在植物研究及育種上的應用 (溫等，2017)。期望利用參訪所得資訊，作為將來規劃我國發展表型體分析中心的重要參考資料。參訪同時

圖一、國家級表型體分析平台。

並與APPF方學者討論雙方未來合作的可能議題，並作為台、澳雙方研擬未來合作議題優先順序的參考。

二、澳洲表型體中心 (APPF)

2007年，澳洲政府、ACT政府、南澳大利亞州政府共同支助阿德雷德大學、聯邦科學與工業研究組織 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) 及澳洲國立大學共同成立澳洲表型體中心，並分別於這三個知名的植物研究單位內設立三個分支中心，分別為阿德雷德之植物加速中心 (阿德雷德大學Waite校區)、坎培拉黑山研究園區之高解析植物表型體中心 (CSIRO, Black Mountain Laboratories) 以及澳洲國立大學分支中心 (ANU node)，期能為澳洲植物學家及育種家提供表型體研究之國際競爭優勢，並作為推動跨領域研究及國際合作的平台，以提升澳洲相關研究社群於國際的影響力。

(一) 植物加速中心 (PA)

PA於2010年1月設置於阿德雷德大學Waite校園內，結合數位化影像分析、高通量計算分析及機器人技術，使其能夠以自動化、高通量及非破壞性方法，精準量測植物生長及外表型的資料。目前該中心有15位職員，專長涵蓋植物生理、商業經理、工程、生物資訊分析及維修技工等領域。

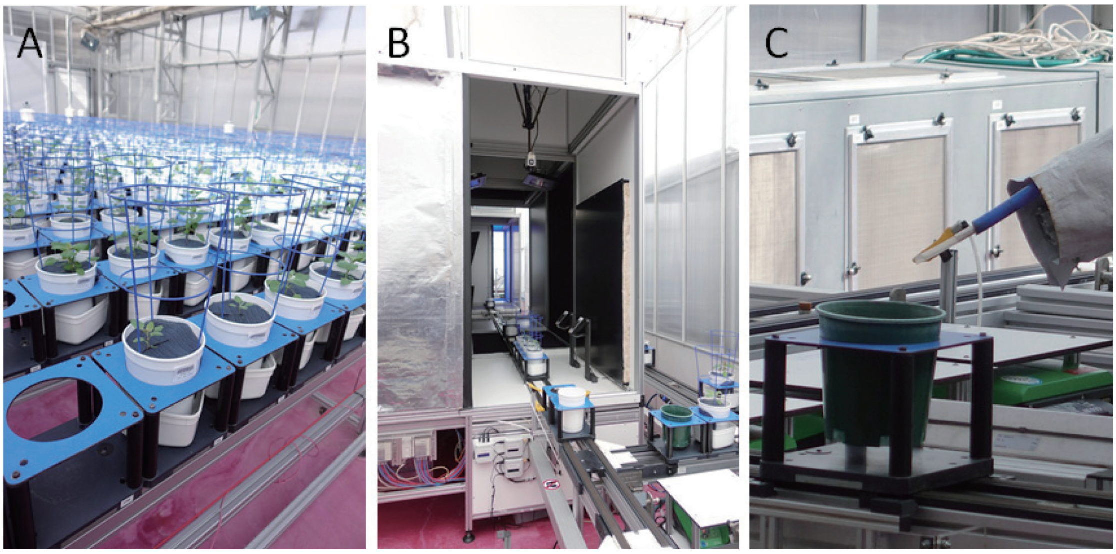
PA根據環境友善的概念，設計中心的供水及排廢系統。尤其，PA有試驗涉及基因改造植物的表型體分析。因此，亦將基改防護的概念導入其排廢系統，達到零花粉排放，甚至廢水及廢棄物皆經過合適處理後方能排放出去。而其步入式表型體設施，可用不同燈源的照射條件，探討每個植物個體對燈源的反應及收集相關的表型資料。另一方面，該中心的智慧型表型體分析溫室具有四個智慧型環控溫室 (Smart house) 區域，分別配有輸送帶系統及影像分析工作站 (LemnaTec Scanalyzer 3D)，能夠進行非破壞性的植物表型體分析。每個單元可種植600株植物，4個單元共可處理2,400株植物 (圖二)。偵測器的部分，配備有紅綠藍光 (RGB) 及螢光等偵測器，前者可量測植物的高度、寬度、植冠密度、葉色及老化程度；後者則可量測植物老化、黃化及壞死病斑。因此，能夠快速及大規模地量測植物生理，有效解決外表型分析瓶頸，增加作物育種的效率。此外，溫室亦配有環境監控系統，可以即時量測與紀錄溫室內的溫度、濕度等環境因子，同時回饋系統進行環境的調控。PA並利用德國Phenospex公司的DroughSpotter系統進行小麥耐旱表型體分析，以及協助阿德雷德大學之植物基因體中心進行小麥耐旱QTL的探索 (圖三)。

(二) 高解析植物表型體中心 (HRPPC)

HRPPC在2009年7月於坎培拉由CSRIO的農業及食品生產中心與澳洲國立大學共同建置營運。該中心主要研究課題分別為 deep phenotyping」(研究植物內部的代謝與生理過程) 及 reverse

phenomics」(剖析植物重要性狀，進而了解其分子機制的基礎)。同時，該中心亦致力於開發次世代表型體技術，如表型體分析機器人、影像分析技術及IT分析平台，以應用於環控溫室或田間偵測植物生理功能及外表性狀表現。

HRPPC已經完成高解析作物植株溫度感測器—Helipod的開發，主要加載在直升機上，具備有FLIR SC64遠紅外線照相機及3,000萬畫素的高解析RGB相機，同時整合IMU及GPS系統，可以快速精準偵測田間作物的植株溫度的變化，進而探討大田模式下，植物因應環境對水分的管理。另一方面，HRPPC設置有Cropatron是一種類似人工氣候室的玻璃溫室，具備高度環境控制能力、PC2等級防護、環境監測感測器 (溫度及濕度) 及整合型多維度的高解析表型體偵測器。其中，整合型多維度表型體偵測器可以進行超光譜分析 (植物代謝、生理量測)、遠紅外熱影像分析 (植株溫度、水份量測)、LiDAR (植株株型影像) 及RGB影像分析 (株型、顏色量測)。目前，該中心已利用此表型體設施，進行環控下植物生長的表型體分析，同時發展各式重要作物性狀的表型體分析方法。此外，該中心亦開發一套類似LemnaTec Scanalyzer 3D的影像分析工作站 (PlantScan™) 及輸送帶系統。PlantScan™可分析幾公分至1.4公尺高度的植物，具備多波長感測器、光學影像感測器及LiDAR感測器，同時結合相機校正、影像處理及3D影像重建技術，可分析植物結構外觀的表型資料，如植株外觀、植株表面積、葉數、葉面積、株型、顏色、面積及體積等，據此影像分析工作站可即時記錄整個植物生長過程的表型體資料。因此，我國未來建造輸送帶系統及影像分析工作站的表型體分析溫室，除了參酌德國LemnaTec Scanalyzer 3D系統外，亦可考量HRPPC開發的PlantScan™系統。



圖二、植物加速中心Smarthouse之輸送帶系統 (A)、影像分析工作站 (Scanalyzer 3D, LemnaTec Inc.) (B) 及自動澆水灌溉系統 (C)。

圖三、植物加速中心之耐旱表型體分析設備 (DroughtSpotter, Phenospex Inc.)。

本次參訪除了瞭解APPF在實驗室及溫室等級的表型體分析設施外，另一重要目的即是瞭解APPF在大田模式表型體分析設施之發展。因此，本次亦安排參觀HRPP在坎培拉郊區小麥試驗田的Phenomobile lite、環境監控系統及Arducrop感測系統 (圖四)。其中，Phenomobile lite是由HRPPC新開發的田間自走式表型分析機器，其上配備戶外雷射感測器 (LiDAR)、RGB及熱影像照相系統、不同光譜感測器及電腦分析系統。該系統目前已開發至第三代，並實際運用在田間水稻 (IRRI及HRPPC)、小麥 (HRPPC) 等旱作模式的非破壞性外表型分析，如植株高度、遮陰面積、葉面積，株型分析、密度分析及葉顏色等。同時HRPPC亦在田間設置相當的環境監控系統，可以偵測植株溫度、環境溫濕度及土壤溫度等，上述表型及環境監測分析數據，均先傳送到一無線傳送器，再藉由3G通訊方式，將相關資料傳送回實驗室，進行相關的紀錄及分析。此外，HRPPC亦針對田間模式，開發了具備IR偵測器之ArduCrop感測器，可進行田間熱影像的偵測，

圖四、高解析植物表型體中心之田間表型體設施。(A) Phenomobile lite；(B) 環境監控系統及 (C) Arducrop感測系統。

藉此瞭解田間植株因應環境而對植物體內水分的管理情形，也讓種植者瞭解到田間灌溉管理的實際情形。

(三) 澳洲國立大學分支中心 (ANU node)

ANU node主要任務是開發實驗室等級的表型體分析技術及建立高效影像分析平台，該中心亦具備走入式表型體設施，其與PA不同之處，是架設了高解析相機，可進行植物對非生物逆境影響的表型體分析。同時，亦建置有表型體虛擬實境 (virtual reality, VR) 系統，可以虛擬田間所有植物的生長情形、環境因子，如土壤與環境溫度等 (圖五)。此系統除了可供田區管理人員快速了解農場植物生長情形外，亦頗具教育性，或可應用在表型體技術之公民教育。

三、結論與建議

綜合本次澳洲參訪及回國後所蒐集之相關資料，獲得下列心得感想與建議。目前本旗艦計畫已組建一表型體研究團隊，包含中研院、台灣大學、中興大學及農業試驗所。計畫原擬於中研院及大學院校建置步入式表型體生長箱及小型溫室型表型體設施，供植物生理、基因體等基礎研究之應用；另外，在農業試驗所建置大型溫室及田間型之表型體設施，供種原篩選及特定性狀育種之相關應用。然而有鑒於APPF不管在PA、HRPPC或是ANU node，均投入多年規劃設計與超過數億台幣的資金，才得以進行相關設施的建置及開發。考量在國內目前有限的農業科研經費下，是否能如原先的規劃於多處設置表型體分析設施？還是要資源集中在少數地點，建置國家級表型體分析中心，這可能是大家要認真思考的問題。

本計畫在溫室及田間型表型體設施原型機系統的最初考量，包括荷蘭Phenospex及德國LemnaTec等公司所開發系統。然而，建造一個精密的環控溫室，再搭配上述公司的掃描系統或是田間表型體分析系統，花費約數千萬至數億台幣，要價不斐。本次訪問APPF旗下的HRPPC，發現其已開發出許多表型體分析設備，如Cropatron玻璃溫室設施、PlantScan光學分析系統以及Phenomobile Lite系統，均已被廣泛應用在各種表型體分析，且上述設備或分析系統已非專屬授權於澳洲Phenolytics公司，其造價較前述Phenospex及LemnaTec公司低廉，因此未來我們在建置相關系統時可以有更多元的選擇。

參訪APPF由PA、阿德雷德大學ARC植物能源生理卓越中心及植物基因體中心等單位所組成的團隊，發現一個成功的表型體研究團隊，須結合植物生理

圖五、澳洲國立大學分支中心之表型虛擬實境 (virtual reality, VR) 系統操作情形。

學、遺傳學、作物栽培、育種學、農業機械、環境控制、統計學、生物資訊學、大數據分析技術等跨領域專家，方能有實質的研究產出與產業服務。尤其，單以PA一處就具備15位正式職員，涵蓋植物生理、機械工程、生物資訊、影像分析及維修技工等領域。未來台灣在建置表型體分析中心時，如何集結相關領域研究人才，並組成一個具備實質執行能力的團隊，亦是一個重要的關鍵。

澳洲氣候屬於大陸型氣候，是地球上最乾燥的區域之一，平均年降雨量不到600 公釐。因此，APPF多針對植物對環境等非生物逆境抗性 （耐旱、耐熱）之表型體分析。然而，台灣近來受極端氣候的影響，導致降雨時間、區域集中，因而常造成台灣不定區域發生水資源不足或嚴重水災。此外，台灣氣候高溫潮濕，原是各種病原微生物生長的溫床。所以在台灣栽培環境下對多數的作物而言，除了具備耐熱、耐旱等特性外，抗病性及耐淹特性亦將是育種須要面對的重要課題。另一方面，APPF目前研究的作物係以小麥及水稻為主，該中心對於台灣種苗產業需求之蔬菜、花卉等作物的相關表型體分析之經驗則較為缺乏。綜合上述因素，台灣若引進澳洲表型體分析系統，可能需要先針對目標作物及特定性狀，引進合適的表型體分析平台，再微調引進系統，並建立所得表型體結果與目標性狀傳統調查結果間的關聯性，始能運用於目標作物之特定性狀選拔及育種，甚至是相關功能基因探索的基礎科學研究。

台灣研究團隊與APPF未來可就下列三個方向規劃可能合作之議題：(1) 於台灣辦理表型體相關研討會，邀請APPF重要成員訪台演講與實地指導。去年(2018) 9月已邀請HRPPC主任Xavier Sirault博士來台演講與實地指導；(2) 編列預算進行Phenomobile Lite的建置，並導入APPF所開發的田間表型體分析設施及技術；(3) 派遣研究人員至APPF旗下研究分支中心，進行為期3-6個月的短期訓練及合作研究，實地學習APPF相關系統的操作及數據分析邏輯。本所2018年5月已派遣杜元凱助理研究員至HRPPC及ANU node進行為期半年的合作研究。這些合作項目，我們團隊除了持續與APPF進行合作外，亦可作為日後台、澳農業研究合作會議的議題之一。

四、參考文獻

Grosskinsky, D.K., Svensgaard, J., Christensen, S., and Roitsch, T. (2015). Plant phenomics and the need for physiological phenotyping across scales to narrow the genotype-to-phenotype knowledge gap. J Exp Bot 66, 5429-5440.

Porter, J.R., and Christensen, S. (2013). Deconstructing crop processes and models via identities. Plant Cell Environ 36, 1919-1925.

溫英杰、楊佐琦、林大鈞 (2017) 「台灣重要農作物核心種原基因體資源開發及快速育種平台之建置」研究計畫-赴澳洲「蒐集參訪澳洲表型體設施、軟硬體及相關技術相關資料」工作報告。